



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**AUTOMATIZACE EXPERIMENTÁLNÍ SESTAVY PRO
OPTICKOU SPEKTROSKOPII**

AUTOMATISATION OF AN EXPERIMENTAL SETUP FOR OPTICAL SPECTROSCOPY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Hrabina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Dvořák, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Jakub Hrabina**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Petr Dvořák, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Automatizace experimentální sestavy pro optickou spektroskopii

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Optická spektroskopie je základní technikou pro optickou charakterizaci nanostruktur. Tyto opticky aktivní nanostruktury díky své velikosti menší než vlnová délka použitého světla a také díky jejich materiálovým vlastnostem dokáží přímo ovlivňovat prošlé nebo odražené světlo. Nanofotonika, vědní obor studující optické vlastnosti nanostruktur, tak poskytuje aplikace například ve fotovoltice, kvantové informatice nebo při zobrazování biologických procesů v buňkách aj.

Na Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT byla vyvinuta optická sestava pro měření konfokální optické a blízké infračervené spektroskopie jak v transmisní, tak reflexní konfiguraci. Tato optická sestava navíc umožňuje pohyb vzorku pomocí xyz–piezo stolku. Bohužel xyz–piezo stolek a spektrometr jsou od dvou různých výrobců (Nanonics, resp. Andor) a není proto možné plně využívat potenciál, který tato optická sestava nabízí. Hlavním cílem této bakalářské práce bude proto vytvoření programu, který bude komunikovat a efektivně ovládat výše popsané zařízení pro automatické získávání spektroskopických map určité oblasti vzorku, obsahující opticky aktivní nanostruktury.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Provedte rešeršní studii na téma optické spektroskopie a její aplikace v nanofotonice.
- 2) Vytvořte program pro komunikaci a ovládání experimentální sestavy pro optickou spektroskopii.
- 3) Experimentálně ověřte funkčnost programu a demonstруйте jeho použití na kalibračních vzorcích.

Seznam doporučené literatury:

WILFRIED, N., Fundamentals of dispersive optical spectroscopy systems, SPIE—The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington, USA, 2014, ISBN 978-0-8194-9824-3

WILFRIED, N., Applications of dispersive optical spectroscopy systems, SPIE—The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington, USA, 2015, ISBN 978-1-62841-372-4

TKACHENKO, V. N., Optical spectroscopy: methods and instrumentations, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2006, ISBN 978-0-444-52126-2

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vývojem a popisem aplikace, která umožnila plnou automatizaci experimentální sestavy pro spektrální mapování s využitím konfokální optické mikroskopie. Je zde prezentována komunikace se všemi jednotlivými zařízeními a vysvětlen princip sběru dat ze zkoumaného vzorku a jejich následné matematické zpracování. Výstupem z této aplikace je pak vizualizace 2D spektrálních map hodnotících intenzitu a pozici spektrálních píků s možností exportování uživatelsky zajímavých bodových spekter. Mimoto, práce dále popisuje řešeršní studii optické konfokální spektroskopie s aplikacemi do nanofotoniky. Navíc funkčnost celé aplikace je demonstrována na spektrální odezvě 2D metapovrchu, který funguje jako Bayerova maska.

Summary

This bachelor thesis deals with the development and description of an application that enabled full automation of an experimental assembly for spectral mapping using confocal optical microscopy. It presents communication with all individual devices and explains the principle of data collection from the examined sample and their subsequent mathematical processing. The output of this application is the visualization of 2D spectral maps evaluating the intensity and position of spectral peaks, with the possibility of exporting user-friendly point spectra. In addition, the work further describes a research study of optical confocal spectroscopy with applications to nanophotonics. In addition, the functionality of the whole application is demonstrated on the spectral response of a 2D metasurface, which acts as a Bayer mask.

Klíčová slova

optická spektroskopie, UV/VIS, fotoluminiscence, 2D mapování, automatizace, metapovrchy, nanomateriály

Keywords

Optical spectroscopy, UV/VIS, photoluminescence, 2D mapping, automatization, metasurfaces, nanomaterials

Bibliografická citace

HRABINA, Jakub. *Automatizace experimentální sestavy pro optickou spektroskopii*. Brno, 2021. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Ing. Petr Dvořák, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jakub Hrabina

Obsah

ÚVOD	2
1 OPTICKÁ SPEKTROSKOPIE	4
1.1 ABSORPČNÍ SPEKTROSKOPIE	6
1.2 EMISNÍ SPEKTROSKOPIE	7
1.3 OPTICKÉ SPEKTROMETRY	9
1.4 APLIKACE SPEKTROSKOPIE	10
2 PIEZOELEKTRICKÝ JEV	11
3 EXPERIMENTÁLNÍ SESTAVA	13
4 ŘÍDÍCÍ APLIKACE	17
4.1 UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ	17
4.2 POHYB VZORKU	18
4.3 KOMUNIKACE SE SPEKTROMETREM	19
4.4 RASTROVÁNÍ	21
4.5 ZPRACOVÁNÍ DAT	22
4.6 VIZUALIZACE DAT	24
4.7 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI	24
5 ZÁVĚR.....	27
LITERATURA.....	28

ÚVOD

V dnešní době stále se vyvíjejících nových technologií je jedním z rozvíjejících se vědních oborů i nanofotonika.[1, 2] Ta se zabývá interakcí elektromagnetického vlnění (tj. světla) a objektů o rozměrech v rámci nanometrů.[3] Poznatky tohoto oboru mají širokou škálu využití například ve fotovoltaiice[4], kvantové informatice[5], optické litografii[6] nebo při zobrazování biologických vzorků a procesů [7]. Zatímco strukturální vlastnosti nanostruktur jako jsou velikost a tvar lze určit například pomocí elektronové mikroskopie (EM) nebo mikroskopie atomárních sil (AFM), optické vlastnosti těchto nanostruktur lze získat pomocí optické spektroskopie.[8, 9]

Historicky většina informací o objektech v našem okolí byla předávána pomocí elektromagnetické interakce, například v astronomii lze z analýzy světla generovaného ze vzdálených hvězd určit chemické složení nebo rychlost pohybu tělesa, aniž bychom zkoumané těleso museli navštívit. Analogicky z analýzy světla lze podobné vlastnosti zjistit o mikroskopických tělesech. Nejzákladnější vědeckou analýzou světla je optická spektroskopie, která zkoumá závislost intenzity světla přicházejícího ze zkoumaného objektu na energii (tj. vlnové délce) světla. V případě zkoumání optických vlastností nanostruktur je nutné vzhledem k jejich rozměrům použít mikroskopických technik, pak mluvíme o optické spektrální mikroskopii (OSM).

Za zakladatele spektroskopie je považován I. Newton i přes to, že nebyl první, který se touto problematikou zabýval.[10] V jeho experimentech demonstroval možnost rozložení bílého světla na jednotlivé barevné složky pomocí optického hranolu a možnost tyto složky znovu zkombinovat v bílé světlo. Jeho poznatky pak byly během začátku 19. století rozšířeny a na základě nich byl vytvořen první spektrometr W. Wollastonem.[11] K dalšímu pokroku došlo na základě práce J. Fraunhofera, který využil k rozložení světla difrakční mřížku, čímž získal řádově větší spektrální rozlišení. Při pozorování spekter slunečního světla identifikoval tmavé pruhy v těchto spektrech, které dodnes nesou název Fraunhoferovy čáry. [12] Později vědci Bunsen a Kirchhoff zjistili, že existuje spojení mezi chemickými prvky a jejich spektry. Tímto vytvořili základ spektro-chemické analýzy. Těchto objevů pak bylo využito například k určování složení vesmírných objektů. Během dvacátého století došlo k mnohým objevům v oblasti fyziky a spektroskopie. Ta se postupem času začala rozdělovat na další specifické typy.

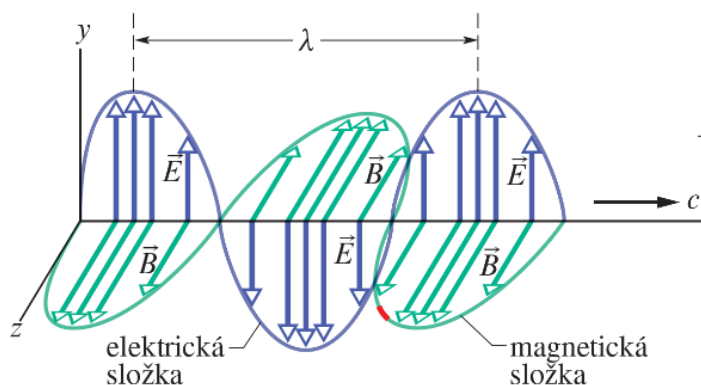
Tato práce bude věnovat nanofotonice. K tomuto účelu je nutné sbírat optický signál jen z malé laterální oblasti na vzorku, a proto musí být použita konfokální optická mikroskopie, jejíž historie sahá do roku 1957, kdy byla tato technika patentována Marvinem Minským. Tato metoda je založena na sbírání optického signálu ze vzorku přes aperturu s malým zorným úhlem (tzv. nízkou numerickou aperturou). Laterální rozlišení je pak omezeno difrakčním limitem světla, který závisí na numerické apertuře použitého objektivu a vlnové délce použitého světla. Abychom získali informaci ze zkoumané plochy vzorku, je potřeba vzorkem rastrovat a vytvořit tak 2D (v našem případě spektrální) mapu.

Na Ústavu fyzikálního inženýrství Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně (ÚFI FSI VUT) byla za tímto účelem vyvinuta experimentální sestava skládající se z konfokálního mikroskopu, spektrometru a piezoelektrického stolku pro precizní pohyb se vzorkem. Avšak protože tyto jednotlivé zařízení jsou od různých výrobců není možné použít komerčně dodávané softwary pro vzájemnou komunikaci mezi nimi. Prvním cílem této práce bylo vytvořit program, který bude umět navázat

vzájemnou komunikaci mezi všemi experimentálními zařízeními. Druhý problém je s časovou náročností optické spektrální mikroskopie, protože pokud si například vezmeme typickou expoziční dobu pro získání jednoho spektra, která se pohybuje okolo 1 s, pak při rozlišení spektrální mapy $100 \times 100 \text{ px}^2$, tak celková doba měření dosahuje řádu desítek hodin. Proto je vhodné tento experiment automatizovat, což je druhý cíl této práce. Posledním cílem je tato získaná experimentální data vhodně vizualizovat, aby je bylo možno dále vědecky prezentovat.

1 OPTICKÁ SPEKTROSKOPIE

Světlo je elektromagnetická vlna šířící se vakuu rychlostí světla $c = 300\,000\text{ km/s}$ a je charakterizována svou vlnovou délkou, jak je zobrazeno na obrázku 1.1, kde \vec{E} je vektor elektrické intenzity a \vec{B} je vektor magnetické indukce.



Obrázek 1.1 Schematický obrázek elektromagnetické vlny o vlnové délce λ šířící se zleva doprava rychlostí světla. Převzato a upraveno z [13].

Z obrázku je patrné, že tyto dva vektory jsou na sebe vždy kolmé a jejich velikost je svázána přes rychlost světla vztahem

$$\frac{E}{B} = c. \quad (1.1)$$

Z tohoto poměru vyplývá, že velikost E je vždy o mnoho větší než B . Rychlost přenosu energie na jednotku plochy elektromagnetickou vlnou je popsána Poyntigovým vektorem \vec{S} . [13] Tento vektor je ve vakuu definován vztahem

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}, \quad (1.2)$$

kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ je permeabilita vakua. Vzhledem k tomu, že \vec{B} a \vec{E} jsou na sebe v elektromagnetické vlně kolmé můžeme vztah (1.2) přepsat pro jednotlivé velikosti vektorů na

$$S = \frac{1}{\mu_0} EB. \quad (1.3)$$

Využitím vztahu (1.1) k úpravě rovnice (1.3) získáme výsledný tvar

$$S = \frac{1}{c\mu_0} E^2, \quad (1.4)$$

který vyjadřuje okamžitý tok energie ve směru šíření elektromagnetické vlny. V praxi je užitečnější střední hodnota přenášené energie $\langle S \rangle$, která se označuje jako intenzita vlny I a lze ji vyjádřit jako

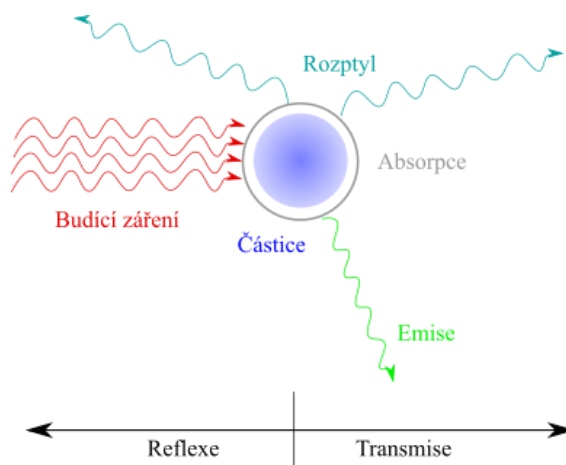
$$I = \langle S \rangle = \frac{1}{2c\mu_0} E_m^2, \quad (1.5)$$

kde E_0 je amplituda elektromagnetické vlny. Většina optických detektorů včetně CCD kamer, které se používají ve spektrometrech, detekuje právě intenzitu světla, která je tedy úměrná kvadrátu amplitudy dopadající vlny $I \propto E_m^2$.

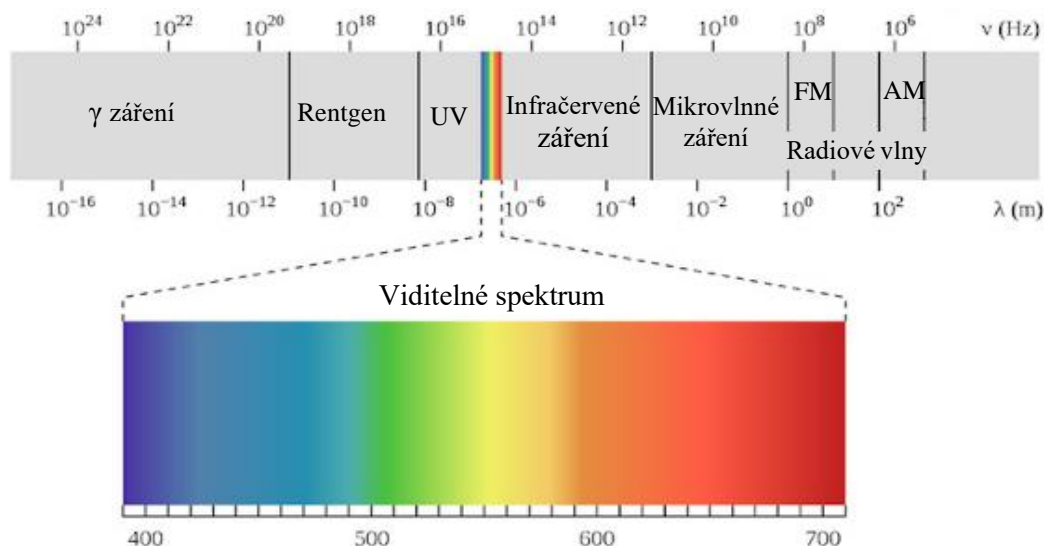
Optická spektroskopie se zabývá studiem interakce hmoty s elektromagnetickým zářením jako funkce intenzity světla v závislosti na energii (tj. vlnové délky) záření, tedy

$I(\lambda)$ [13]. Energie elektromagnetické vlny souvisí s její vlnovou délkou nepřímo úměrně $E = ch/\lambda$, kde h je Planckova konstanta. Mezi základní interakce světla a hmoty patří absorpce, emise a rozptyl a tyto fyzikální jevy mohou nastat buď v transmisní nebo reflexní konfiguraci, jak je zobrazeno na obrázku 1.2. Jednotlivé interakce budou rozebrány v kapitole 1.1 a 1.2.

Optickou spektroskopii je dále možné dělit podle elektromagnetického spektra a podle energie budícího záření. Mezi příklady je možné uvést ultrafialovou (UV), optickou (VIS), infračervenou (IR) nebo rentgenovou (X-ray) spektroskopii, kde spektrální oblast je vymezena dle obrázku 1.3. Tato práce se zabývá spektroskopií VIS a blízkou IR, která hraje hlavní roli v nanofotonice a při optické charakterizaci nanostruktur, jelikož je zde energie excitačního záření v rozsahu 1-3 eV. A právě v tomto rozsahu energií vznikají a existují tzv. kvazičástice jako je například fonon [14], exciton [15] nebo plazmon [16].



Obrázek 1.2: Model interakce záření s látkou, kde mohou nastat tři fyzikální jevy: rozptyl, emise a absorpce. Na základě směru šíření záření po interakci lze rozlišit reflexi a transmisí.



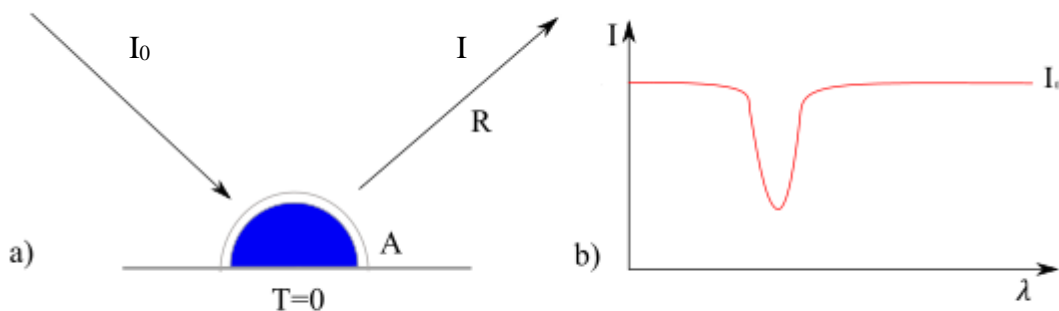
Obrázek 1.3: Elektromagnetické spektrum (tzv. Maxwellova duha) rozdělena podle vlnové délky a frekvence světla s detailem na viditelnou oblast (v detailu jsou použity jednotky nm). Převzato a upraveno z [33].

1.1 Absorpční spektroskopie

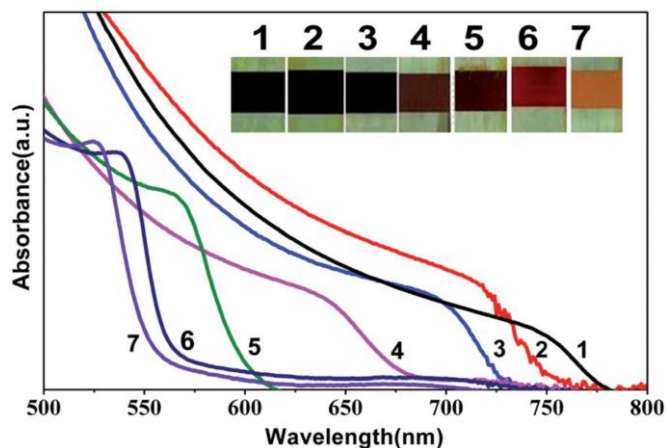
Absorpční spektroskopie se zabývá absorpcí energie a tím způsobeným poklesem intenzity detekovaného záření v závislosti na energii (vlnové délce) dopadajícího záření.[17] Při průchodu svazku vzorkem většina záření projde beze ztráty intenzity. Avšak při určitých vlnových délkách je pozorován pokles intenzity detekovaného signálu, kde tato korespondující energie většinou odpovídá vzniku konkrétní kvazičástice ve studovaném vzorku. Díky tomu je možné studovat fyzikální podstavu těchto kvazičástic, které na druhou stranu mohou vypovídat o vlastnostech vzorku, například o elektronové či krystalové struktuře. Značnou výhodou absorpční spektroskopie je, že poskytuje jak kvalitativní, tak kvantitativní informaci o vzorku.

Absorpci se rozumí pohlcení elektromagnetického záření atomem, molekulou nebo krystalickou látkou.[18] Fyzikálně se jedná o energetický přechod ze základního stavu do stavu excitovaného (stav s vyšší energií), který může případně doprovázet vznik kvazičástice. Ze zákona zachování energie platí, že $A + T + R = 1$, kde A je absorpce, T je transmittance a R je reflektance. Tyto veličiny popisují poměr pohlcené (absorbované), prošlé nebo odražené intenzity vůči intenzitě budícího záření. Absorbanci látky nelze změřit přímo, a proto musíme využít tohoto vztahu. V případě netransparentního substrátu lze transmittance položit rovna nule a poté je možné absorpenci vyjádřit jako $A = 1 - R$.

Příkladem pokročilých materiálů, na které se zaměřuje výzkum nanofotoniky, absorbujících záření jsou perovskity. V tomto kontextu je označením perovskity myšlena skupina materiálů se stejnou strukturou (ABX_3 , kde A a B reprezentují kationty a X je anion) jako konkrétní minerál zvaný Perovskit ($CaTiO_3$) [19]. Na obrázku 1.5 je znázorněna absorpce perovskitů $MAPbBr_3$ a $MAPbI_3$ s různým poměrem halogenidu a fotky měřených vzorků. Na absorpčních spektrech je vidět, že tyto perovskity absorbují různé vlnové délky a tedy různé energie dopadajícího záření, kterou jsou poté schopny pomocí kvazičástice vodivostního páru elektron-díra konvertovat na elektrickou energii. Tyto materiály mají proto široké uplatnění ve fotovoltaických článcích [20], LCD (Liquid Crystal Display) [21] a LED (Light-Emitting Diode) [22].



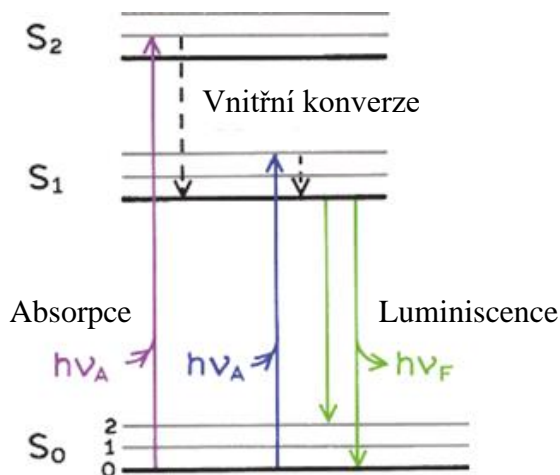
Obrázek 1.4 a) Znázornění absorpce při nulové transmisi b) Znázornění závislosti intenzity I na vlnové délce absorpčního spektra



Obrázek 1.5 Znázornění absorpčních spekter perovskitů MAPbI_3 a MAPbBr_3 různých poměrů (fotografie vzorků 1-7). Převzato z [34]

1.2 Emisní spektroskopie

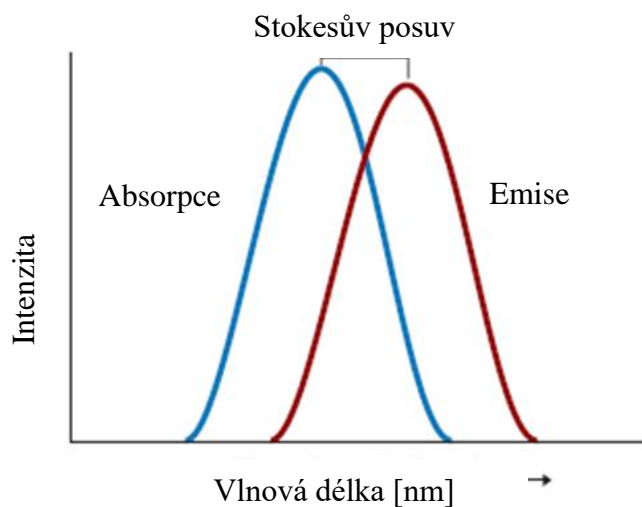
Látky (atomy a molekuly), které jsou excitovány do vyšších energetických stavů, jsou schopny spontánně přejít do nižšího základního stavu a přitom je vyzářena ve formě světla přebytečná energie.[17] Elektron v základním stavu napřed energii absorbuje a pak ji vyzáří ve formě fotonů (tzv. luminiscence), jak názorně ukazuje tzv. Jablonského diagram (viz obrázek 1.6). Excitace elektronů do vyšších energetických hladin může být způsobena různými vnějšími vlivy. Dále se v této práci zaměříme na excitaci elektromagnetickým zářením, poté se proces vyzáření fotonů z látky nazývá fotoluminiscence.



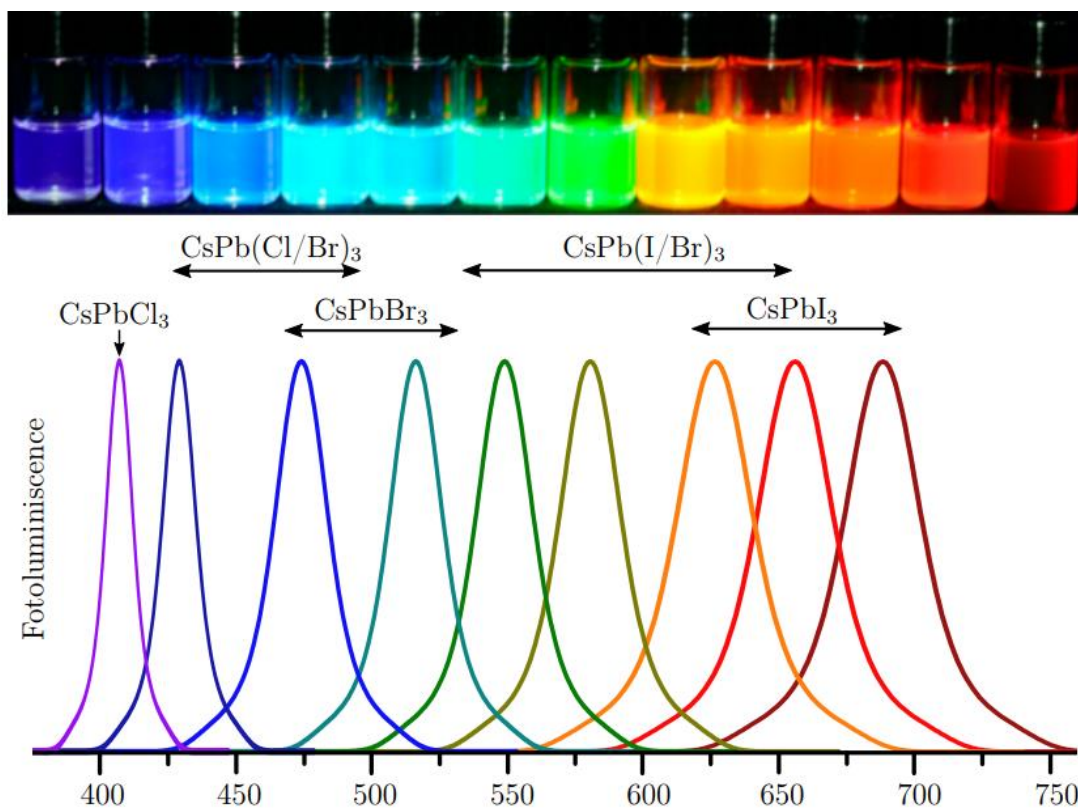
Obrázek 1.6 Jablonského diagram zobrazující proces fotoluminiscence v atomu s diskrétními hladinami energií. Převzato a upraveno [35].

Z Jablonského diagramu je patrné, že fotoluminiscence má typicky nižší energii než excitační záření. Tato vlastnost byla poprvé pozorována sirem G. G. Stokesem už v roce 1852. Tento posuv ve fotoluminiscenci k vyšším vlnovým délkám (tj. nižším energiím) záření se nazývá Stokesův posuv a je schematicky zobrazen na obrázku 1.7. Nicméně existují i vnitřní procesy v krystalických látkách (např. v perovskity CsPbBr_3), které

mohou generovat fotoluminiscenci o vyšší energii, než bylo excitační záření, tento jev se pak nazývá anti-Stokesovým posuvem.



Obrázek 1.7 Graf znázorňující absorpční spektrum excitačního záření a emisní spektrum vznikající fotoluminiscence. Rozdíl mezi pohlcenou a vyzářenou vlnovou délkou se nazývá Stokesův posuv. Převzato a upraveno z [36].

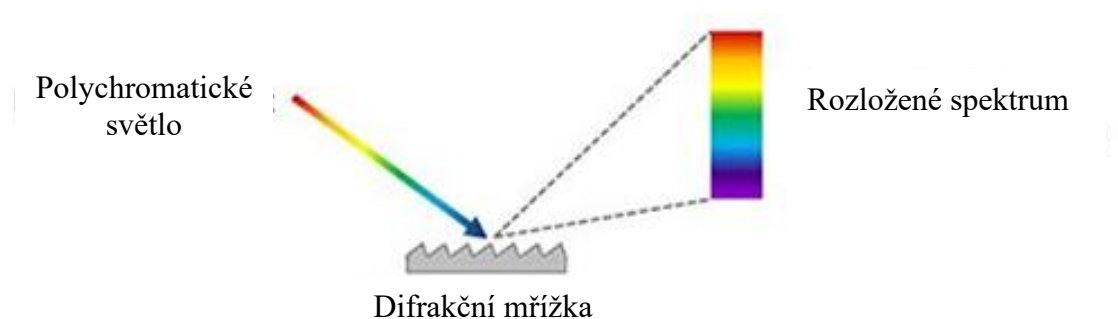


Obrázek 1.8 Jednotlivé vzorky kvantových teček perovskitů s různou velikostí a různým poměrem halogenidu Cl, Br a I. Odpovídající emisní spektra fotoluminiscence těchto kvantových teček. Převzato a upraveno z [37].

Fotoluminiscence je využívána zejména při značení molekul nebo atomů v případě mikroskopického zobrazování biologických vzorků a procesů. Například je možné funkcionalizovat luminiscenční nanočástice (tzv. kvantové tečky) konkrétní chemickou molekulou a sledovat její pohyb uvnitř buněk nebo dokonce i jednotlivých částech buňky. Příkladem takových nanočástic jsou kvantové tečky perovskitů (CsPbCl_3 , CsPbBr_3 , CsPbI_3), které dokáží pokrýt svoji fotoluminiscencí celé VIS spektrum (viz obrázek 1.8) a navíc vykazují kvantovou účinnost až 90 % a jejich výroba je snadná a levná.

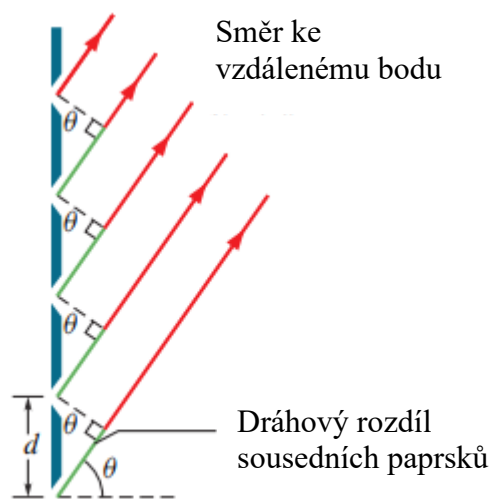
1.3 Optické spektrometry

Cílem spektrometru je měřit interakci nebo emisi elektromagnetického zařízení s látkou [5]. Pro získání maximální informace ze vzorku by měla interakce/emise být měřená jako funkce vlnové délky. Základní součástí těchto systémů je tedy systém rozložení polychromatického světla na spektrum.



Obrázek 1.9 Diagram rozložení světla difrakční mřížkou. Převzato a upraveno z [38]

Toho je obvykle docíleno pomocí difrakčních mřížek. Tyto mřížky mají velké množství tenkých štěrbin, pomocí kterých je docíleno rozložení světla na spektrum. K tomuto rozdělení dochází na základě interference světla po průchodu mřížkou. Vezmeme-li vzdálenost d dvou štěrbin mřížky bude dráhový rozdíl dvou sousedních paprsků $d \sin \theta$ viz obrázek 1.10.



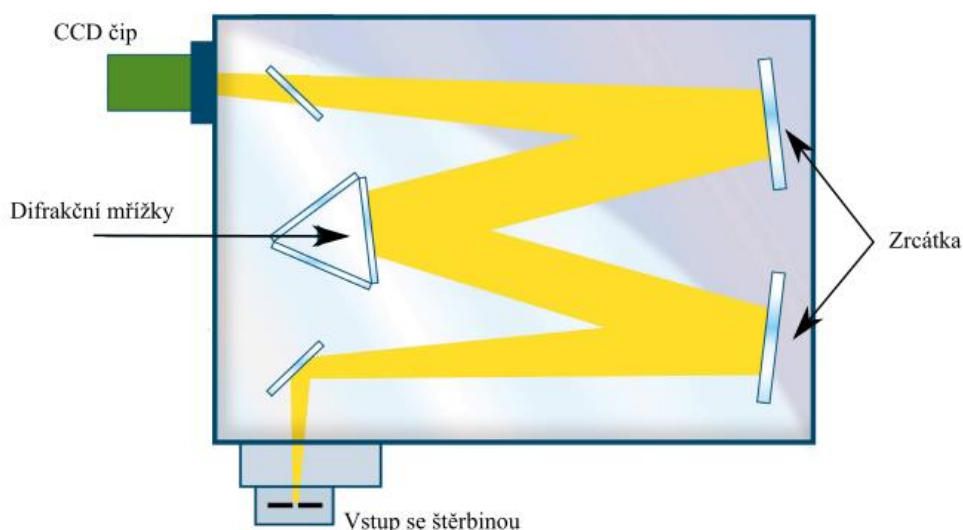
Obrázek 1.10 Diagram znázorňující dráhové rozdíly mezi paprsky světla po průchodu difrakční mřížkou. Převzato a upraveno z [13]

Ve vzdáleném bodě bude světlo viditelné pouze pokud bude tento dráhový rozdíl celým násobkem vlnové délky světla. Tedy když bude platit $d \sin \theta = m \lambda$, kde $m = 0, 1, 2, \dots$ a λ je vlnová délka procházejícího světla. K rozložení na spektrum dojde právě na základě závislosti na vlnové délce.

Samotná difrakční mřížka nemusí být tvořena pouze štěrbinami, může být tvořena i rovnoběžnými zářezy nepropustném materiálu. V tomto případě není světlo rozloženo na spektrum po projití skrz ale po odrazu.

Rozložené spektrum pak bývá detekováno pomocí CCD čipů (z anglického Charge-coupled device). Tyto čipy umožňují detekci na dvourozměrném poli pixelů pomocí fotoefektu. Z tohoto čipu se pak dají vyčíst hodnoty náboje vytvořeného na jednotlivých pixelech.

Na obrázku 1.11 je zjednodušený náčrt spektrometru. Světlo, jehož spektrum chceme změřit je přivedeno na vstup. Nejčastěji je k tomu využito optické vlákno. Po vstupu je světlo systémem zrcátek vedeno na difrakční mřížku. Znázorněný spektrometr obsahuje tři difrakční mřížky s různými vlastnostmi, mezi kterými si uživatel může volit. Spektrum je pak dalšími zrcátky navedeno na CCD čip, kterém je změřeno.



Obrázek 1.11 Znázornění průchodu světla spektrometrem. Převzato a upraveno z [39]

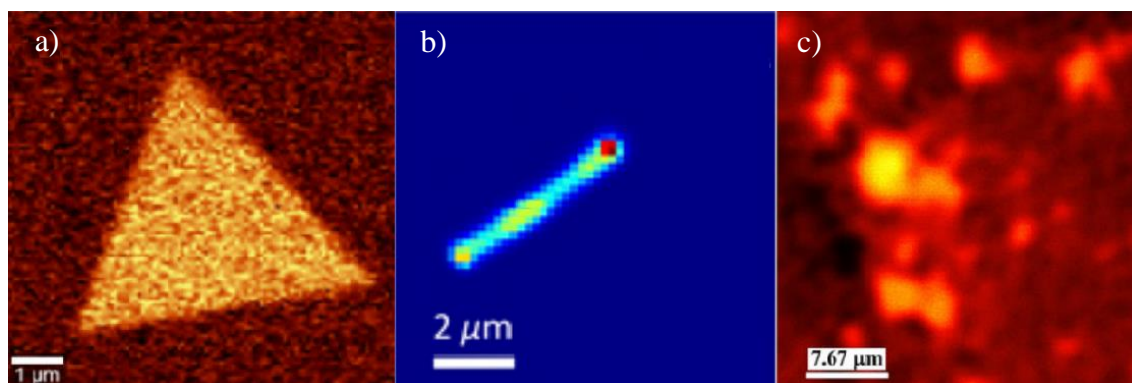
1.4 Aplikace spektroskopie

Možnou aplikací spektroskopie pro nanofotoniku je fotoluminiscenční mapování 2D, 1D a 0D struktur (obrázek 1.12).

Mezi 2D struktury patří vrstvy látek jako například MoS_2 [23], WSe_2 [24] nebo grafen [26]. Tyto materiály mají využití v široké škále moderních technologií. Příkladem může být využití v solárních panelech, popřípadě fotodetektorech. Uplatnění těchto materiálů je i v elektronice, a to jako polovodiče. Dalšími možnými 2D strukturami jsou optické metapovrchy [28]. Jedním z cílů studia těchto povrchů je umožnit zmenšení optických prvků nahrazením použití klasického lomu světla rozptylem na nanostruktuře.

Do kategorie 1D struktur spadají nanovlákná. [30] Ty také mají využití v oblasti elektroniky a kvantové informatiky především jako polovodiče. Dalším možným využitím nanovláken je detekce látek v rámci chemie a biologie.

Kvantové tečky jsou pak příkladem 0D struktur. [32] Jedná se obvykle o polovodičové krystaly o velikosti řádově v jednotkách nanometrů. Podobně jako výše zmíněné struktury mají uplatnění v oblastech fotovoltiky, fotodetektorů, elektroluminiscenčních diod a biomedicíny.

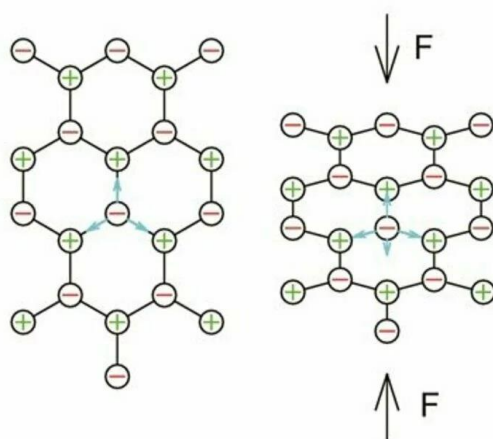


Obrázek 1.12 Ukázky fotoluminiscenčních map: a) Intenzitní mapa vzorku MoS₂ nanostruktury. Převzato z [23], b) Intenzitní mapa nanovlákná. Převzato z [40], c) Intenzitní mapa vzorku s CsPbBr₃ kvantovými tečkami. Převzato z [42].

2 PIEZOELEKTRICKÝ JEV

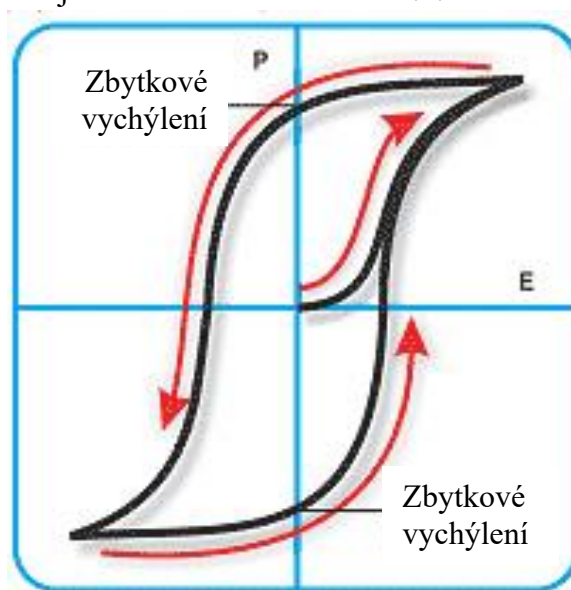
Jedná se o schopnost určitých materiálů vytvářet elektrické napětí při deformaci. Objev tohoto chování je přisuzován bratrům Pierrem a Jacquem Curie, kteří experimentovali v roce s krystaly turmalínu [25].

K tomuto jevu dochází, pokud jsou při mechanickém namáhání materiálu vychýleny ionty krystalické mřížky ze svých pozic viz obrázek 2.1. Vzdálením nebo přiblížením těchto iontů se poruší elektrická rovnováha, což se projeví elektrickým nábojem na povrchu materiálu. Získaný elektrický náboj je přímo úměrný síle působící na materiál a poměr mezi silou a generovaným elektrickým nábojem se označuje jako piezoelektrická nábojová konstanta. [27] Jestli tento jev nastane nebo ne je podmíněno symetrií krystalické mřížky. Přesněji tento jev může nastat pouze u struktur, které nemají střed symetrie. [29]



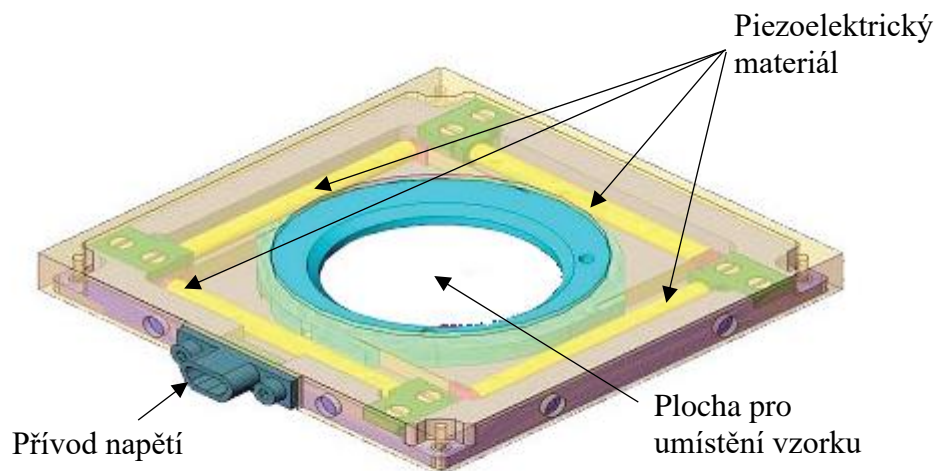
Obrázek 2.1: Znázornění piezoelektrického jevu. Světle modrou barvou jsou vyznačeny vektory elektrostatických sil. Převzato z [41]

Piezoelektrického jevu lze využít i obráceně, než bylo výše zmíněno, a to přivedením napětí na materiál. Působením tohoto napětí dojde k vzájemnému posunu iontů struktury materiálu, což má za výsledek prostorovou deformaci. Po odpojení napětí nedojde k návratu do původní polohy, jelikož materiál zůstane částečně polarizován v původním směru. [31] Toto chování je znázorněno na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Účinky elektrického pole (E) na polarizaci materiálu (P) a odpovídající deformaci. Převzato a upraveno z [43]

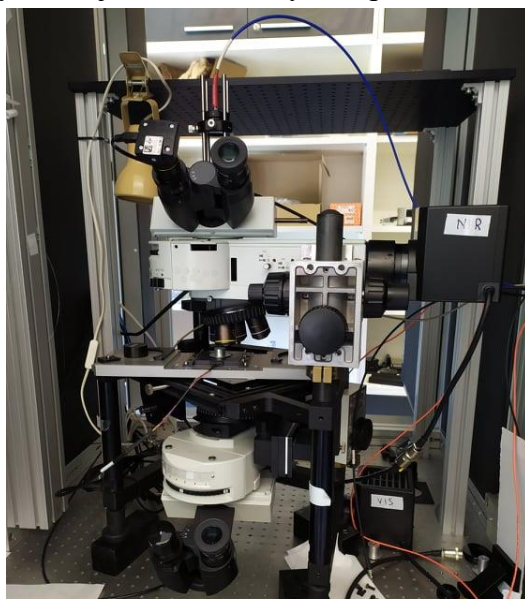
Jedním z mnoha možných využití piezoelektrického jevu je piezoelektrický stolek, který umožňuje posuvy v rozsahu nanometrů. Takovýto stolek se skládá z volně pohyblivé plochy pro vzorek, která je spojena s pevnou konstrukcí pomocí tyčinek z piezoelektrického materiálu. Pohybu je pak docíleno regulací napětí přivedeného na tyto tyčinky, čímž dojde k jejich prodloužení nebo zkrácení.



Obrázek 2.3 Znáznornění konstrukce piezoelektrického stolku firmy Nanonics. Převzato a upraveno z [44]

3 EXPERIMENTÁLNÍ SESTAVA

Hlavní součástí měřicí sestavy je mikroskop Nanonics MultiView 4000 od firmy Nanonics zobrazený na obrázku 3.1. Ten se skládá ze dvou proti sobě umístěných optických mikroskopů. Toto uspořádání umožňuje osvětlení vzorku v transmisním módu. Další užitečnou vlastností je modularita sestavy, díky které je možno rozšiřovat a upravovat optické prvky, čímž je umožněno využití pro širokou škálu optických metod.



Obrázek 3.1 Mikroskop MultiView 4000

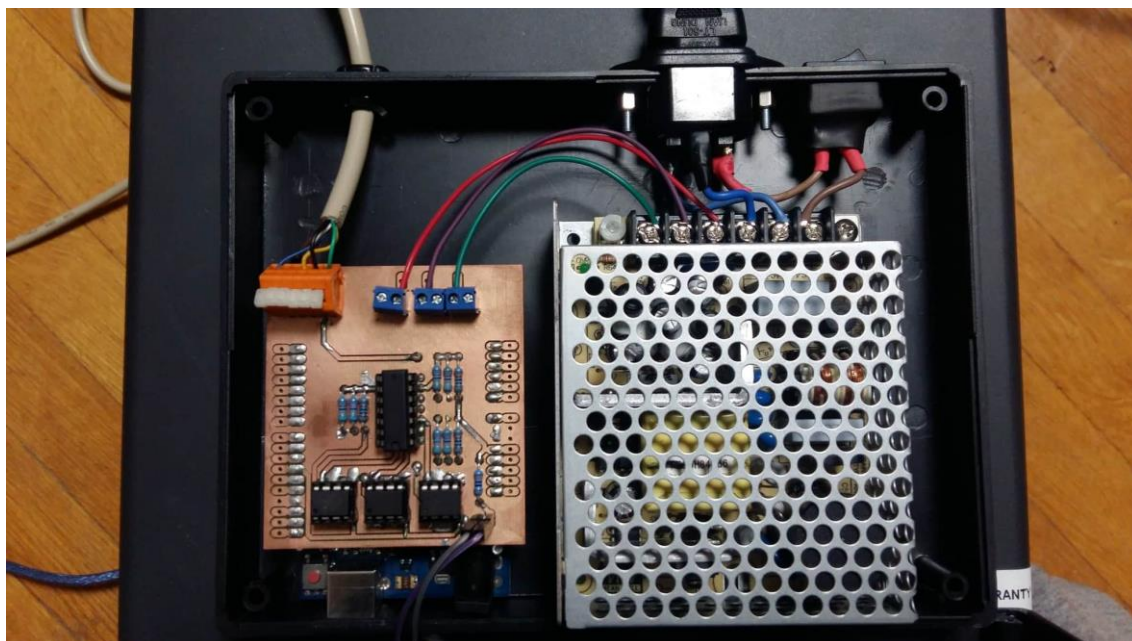
Sběr optických dat ze vzorku je řešen optickým vláknem vedeným do spektrografu Andor Shamrock 303i, který obsahuje otočnou hlavici se třemi difrakčními mřížkami. Natočením pak lze nastavit rozsah spektra dopadajícího na CCD čip. K zachycení spektra je použita kamera Andor iDus 401. CCD čip této kamery má rozlišení 1024×127 pixelů a velikost jednoho pixelu je $26 \times 26 \mu\text{m}$.

Pohyb vzorku je umožněn piezoelektrickým stolem, který je napájený z vysokonapěťového zdroje (obrázek 3.2).



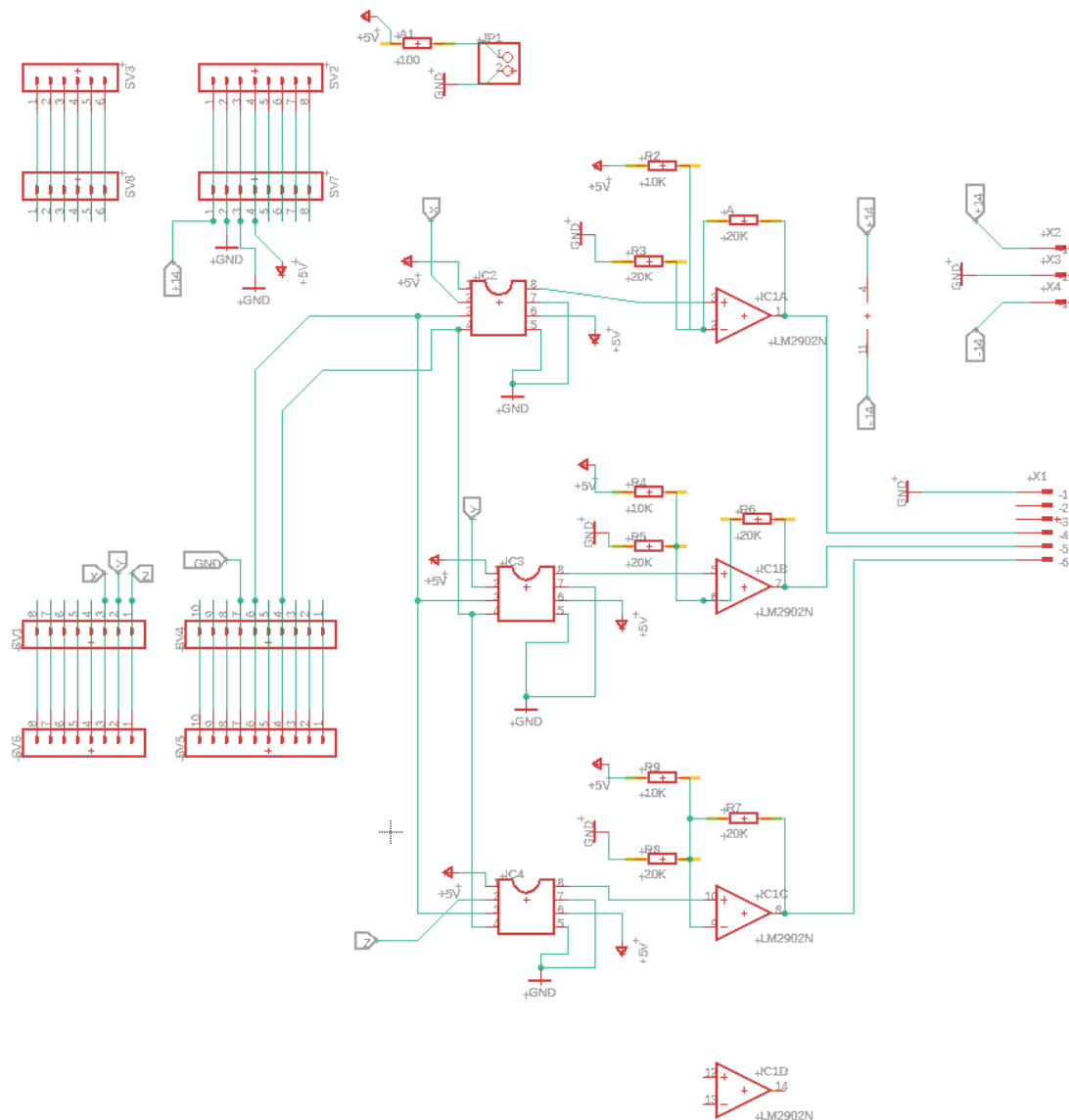
Obrázek 3.2 Vysokonapěťový zdroj piezoelektrického stolku

Výstupní napětí tohoto zdroje lze ovládat vnějším signálem. Za účelem vytvoření tohoto signálu byla v rámci jiné práce vytvořena řídicí elektronika (Obrázek 3.3).



Obrázek 3.3 Elektronika pro řízení piezoelektrického stolku

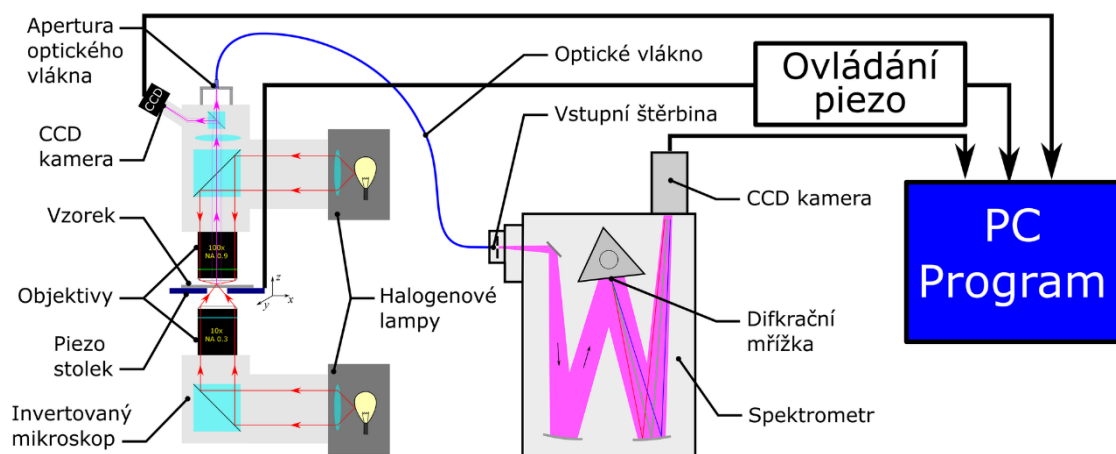
Ovládání je řešeno řízením pomocí desky Arduino UNO. Z ní lze zapisovat hodnoty do třech digitálních potenciometrů. Tyto potenciometry jsou přerazeny operačním zesilovačem, díky kterým je získán výstup v požadovaném rozsahu pro řízení generátoru napětí piezoelektrického stolku. Na obrázku 3.3 je schéma obvodu.



Obrázek 3.4 Schéma řídicího obvodu

Výsledkem této řídicí jednotky je pak možnost nastavit napětí jdoucí na piezoelektrický stolek pro každou osu pohybu stolku samostatně a v rozsahu -140V až 140V.

Schéma kompletní experimentální soustavy je zobrazeno na obrázku 3.5.



Obrázek 3.5 Schéma experimentální sestavy

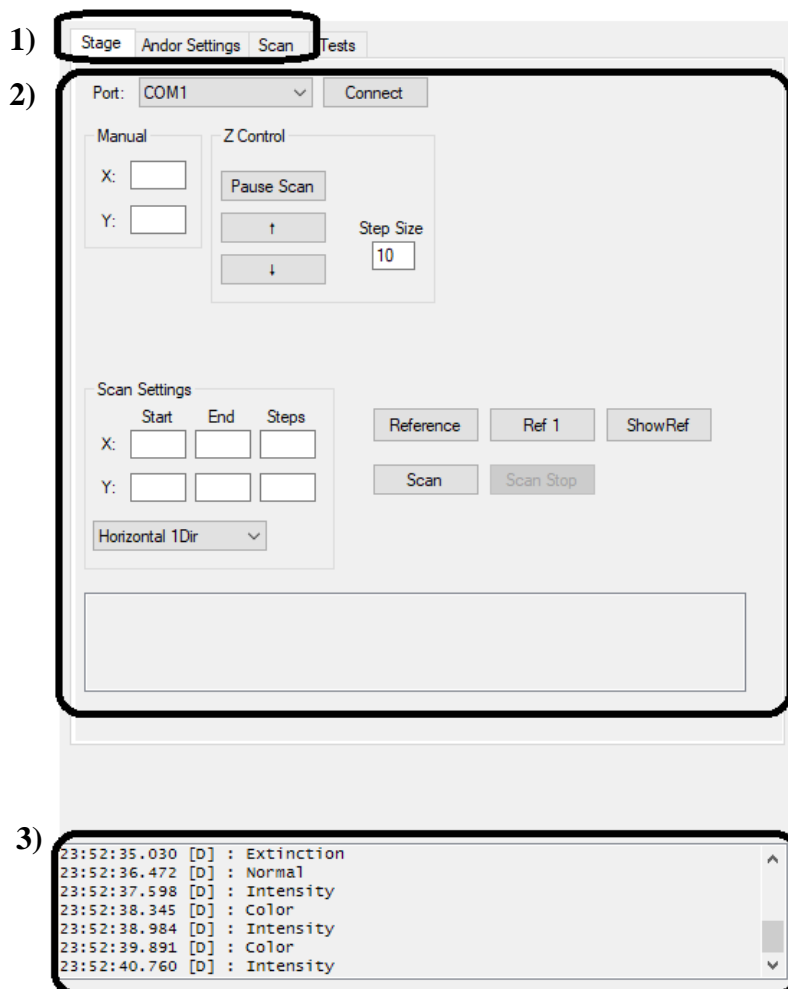
4 ŘÍDÍCÍ APLIKACE

Pro naprogramování řídicí aplikace byl využit programovací jazyk C# a vývojové prostředí Visual Studio 2019. Toto bylo zvoleno na základě jednoduchosti použití a kompatibility s knihovnou spektrometru.

Pro zajištění možnosti automatického sběru dat ze vzorku je nutné zprostředkovat komunikaci mezi aplikací, kamerou spektrometru, arduinem, které ovládá piezoelektrický stolek, a uživatelem.

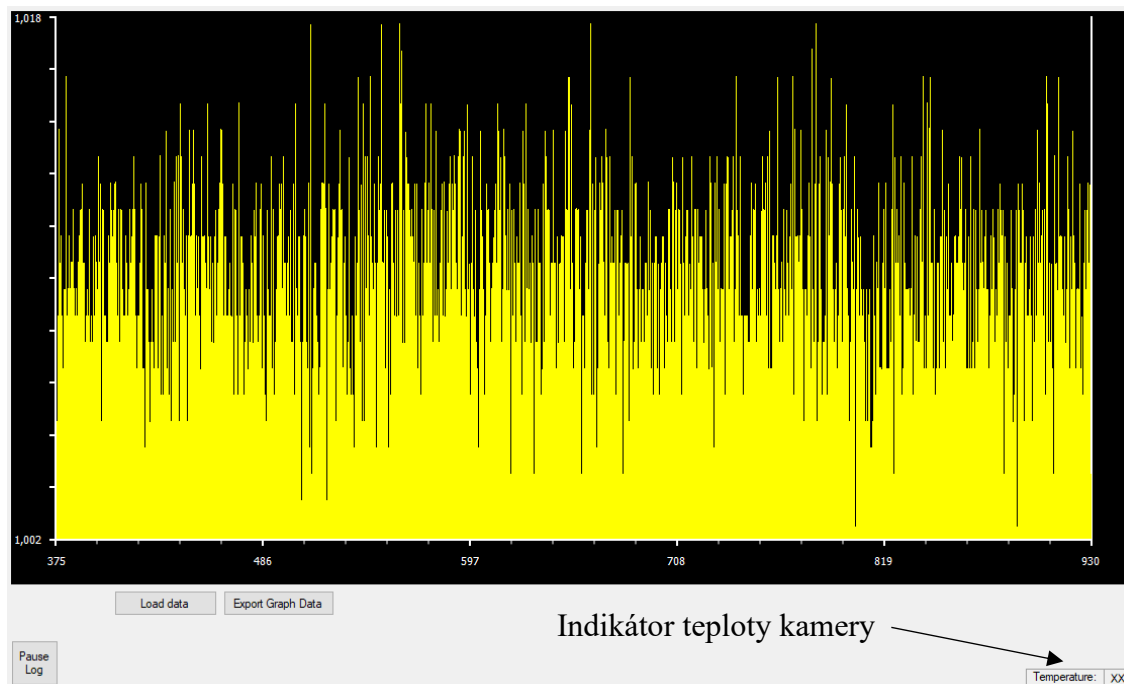
4.1 Uživatelské rozhraní

Základní uživatelské rozhraní aplikace je rozděleno na čtyři části. První tři jsou zobrazeny na obrázku 4.1. V první části je výběr mezi nastavením piezoelektrického stolku, nastavením spektrometru a vizualizací skenu. Druhá část pak obsahuje prvky na základě zvolené kategorie. Třetí pak slouží jako informační okno pro uživatele.



Obrázek 4.1 Grafické rozhraní aplikace, které se skládá ze tří částí: 1) menu výběru mezi nastavením piezoelektrického stolku, nastavením spektrometru a vizualizací skenu. 2) Oblast pro zobrazení prvků na základě výběru v 1. části. 3) Okno pro vypisování informací pro uživatele.

Čtvrtá část uživatelského rozhraní je plocha určená pro vykreslení získaných spekter a indikátor teploty kamery zobrazená na obrázku 4.2.

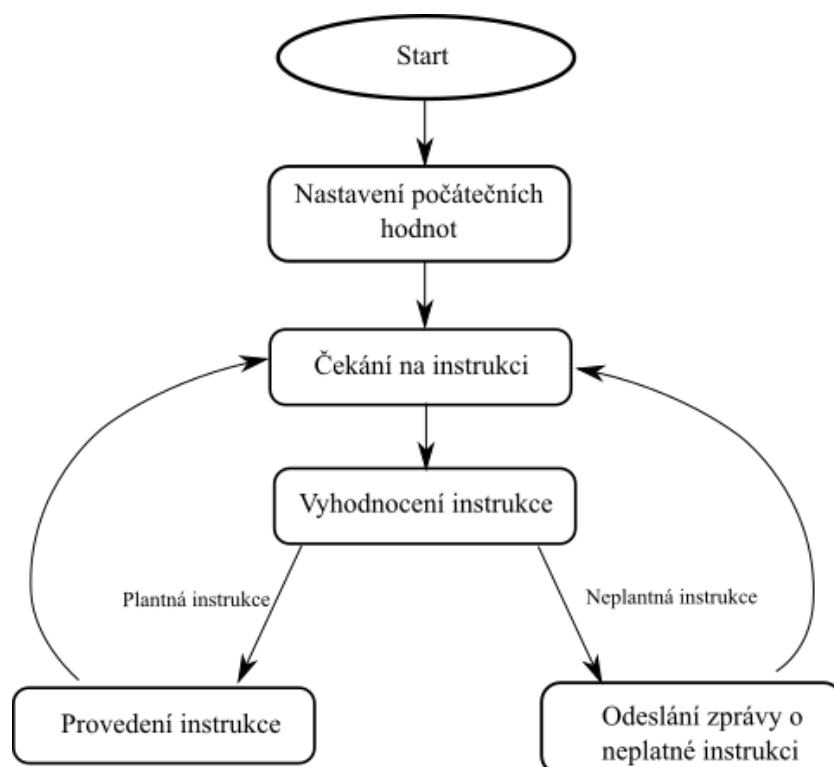


Obrázek 4.2 Část grafického rozhraní určená pro znázornění získaných spekter. V pravém dolním rohu se navíc nachází indikátor teploty kamery.

4.2 Pohyb vzorku

Pohyb stolku je ovládán pomocí desky Arduino UNO, která je součástí sestavy zmíněné v kapitole 4. Pro ni byl vytvořen kód, který při prvním spuštění desky nastaví výchozí hodnoty. Tím je stolek se vzorkem posunut do středu možného rozsahu pohybu stolku. Po vystředění stolku čeká na instrukci ze sériového portu. V momentě, kdy jsou zaznamenány příchozí data, dojde k jejich vyhodnocení. Aby bylo zabráněno vyhodnocení nekompletních příchozích dat je definován startovní a koncový znak. Všechny příchozí data jsou postupně zaznamenávány a jako instrukce pro provedení akce jsou brány pouze data ohraničená těmito znaky. Možné instrukce jsou žádost o zpětnou vazbu, využita pro potvrzení správné komunikace s aplikací, a žádost o pohnutí stolku ve specifické ose.

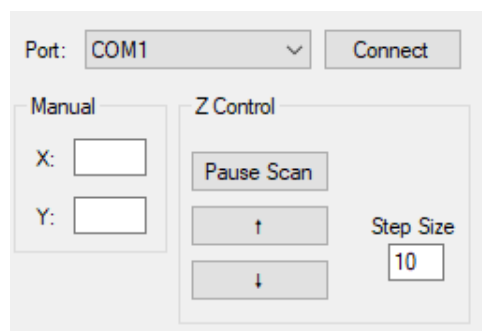
Zpětná vazba pouze vyše pomocí sériové komunikace specifický symbol. Při žádosti o pohyb dojde k vyhodnocení, kterou osou stolku je nutno pohnout a na jakou hodnotu se má pohnout. Na základě těchto informací je proveden pohyb. Nejprve je povolen zápis na pin odpovídající zvolené ose a poté je na něm po drobných krocích měněna hodnota, dokud není dosaženo požadované hodnoty. Hodnota je měněna tímto způsobem místo okamžitého zapsání cílené hodnoty z důvodu ochrany stolku a vzorku. Při prudké změně napětí by docházelo k obrovskému zrychlení a následnému zpomalení stolku se vzorkem.



Obrázek 4.3 Schéma funkce kódu řídicí jednotky piezoelektrického stolku

Po dokončení pohybu je sériovým portem odeslána informace o aktuálně nastavených hodnotách. Při přečtení neplatné instrukce je poslán znak pro chybu.

Pro navázání komunikace mezi aplikací je nejprve v aplikaci nutné zvolit port, kterým je arduino připojeno. Jakmile je navázána komunikace je z aplikace možné hýbat se stolem.



Obrázek 4.4 Grafické rozhraní aplikace pro ovládání piezoelektrického stolku

4.3 Komunikace se spektrometrem

Pro komunikaci se spektrometrem je použita knihovna funkcí od výrobce. Po startu aplikace dojde k zahájení komunikace. V případě že není nalezen připojený spektrometr je v aplikaci vypsána chybová hláška. Při úspěšném spojení je spuštěno chlazení kamery a jsou nastaveny základní parametry pro získání dat. Dále je načteno aktuální nastavení spektrografu. Tyto parametry poté může uživatel upravit v aplikaci dle vlastních potřeb.

Nastavitelné parametry:

- *Acquisition mode* – může být nastaven jediný snímek nebo akumulace více snímků
- *Exposure time* – jak dlouho bude CCD čip sbírat data
- *Number of Accumulations* – v případě akumulační metody získávání dat určuje kolik je pořízeno snímků
- *Grating* – určí která z možných mřížek spektrografu je použita, tím je určen rozsah vlnových délek dopadajících na CCD čip
- *Wavelength* – nastavení středu rozsahu vlnových délek

Andor

Acquisition mode:

Exposure time: s

Number of Accumulations:

Wavelength

Grating:

Wavelength Range:

Wavelength [nm]

Obrázek 4.5 Grafické rozhraní aplikace pro nastavení spektrometru

Získání dat pak probíhá tak, že se nejprve na základě nastavených parametrů automaticky nastaví parametry jako časování snímků a poté se odešle instrukce snímat data kameře. Po dokončení snímání dat kamerou jsou tyto data načteny do aplikace.

4.4 Rastrování

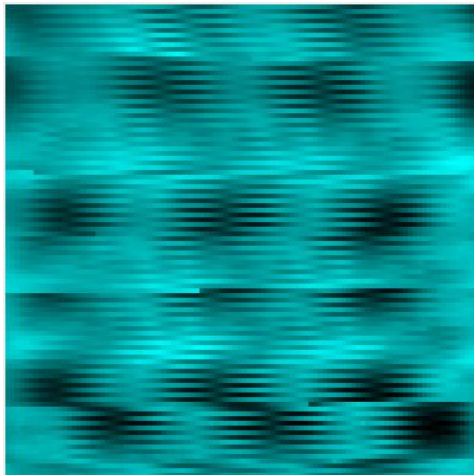
Pro získání dat z plochy vzorku byla vytvořena možnost vytvořit sken. Před spuštěním je nutné nastavit rozsah kde bude sken proveden a z kolika kroků se v každém směru bude skládat. Dále je potřeba udělat referenční snímek pozadí vzorku, který bude později využit ke zpracování dat. Samotný sken pak probíhá opakováním posouvání stolku a sběru dat. V této části je podstatná zpětná vazba z arduina řídícího piezo stolek. Tato zpětná vazba indikuje, kdy je nastaveno požadované napětí a také slouží pro kontrolu správnosti provedení instrukce. Bez této zpětné vazby docházelo k přeskokování některých kroků skenu, což se projevilo silně deformovaným obrazem.



Obrázek 4.6 Schéma průběhu skenu

Při testování rastrování bylo zjištěno, že při změnách směru pohybu stolku dojde ke změně velikosti kroku stolku v reakci na změnu napětí. Toto chování se pak projevuje „zubatým“ obrazem po grafickém znázornění dat viz obr 4.5. Příčinou tohoto chování je hystereze materiálu použitého k pohybu piezoelektrického stolku. Při dlouhém pohybu také občas docházelo k náhodné změně velikosti posuvu, která se projevila viditelným „úskokem“ v obraze viz obr. 4.7.

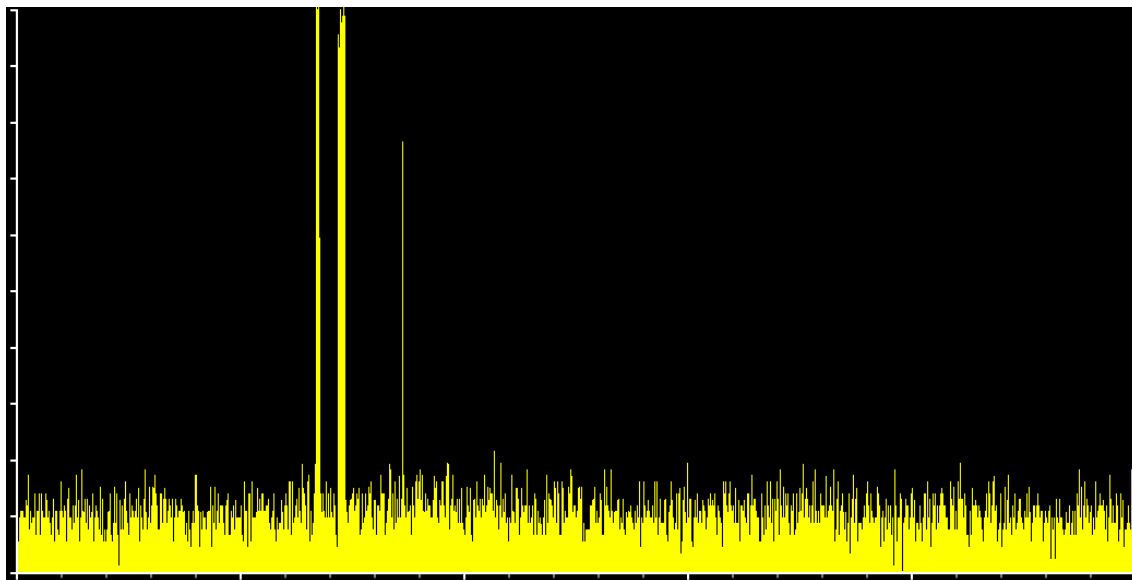
Vzhledem k absenci možné zpětné vazby přesné polohy piezo stolku nelze tento problém řešit řízením pohybu na základě polohy. Ovlivnění skenu hysterezním chováním bylo minimalizováno sběrem dat pouze v jednom směru pohybu. Náhodné „úskoky“ se neprojevují, pokud je skenovaná oblast dostatečně malá. V tomto případě se jedná o plochu přibližně $30 \times 30 \mu\text{m}$.



Obrázek 4.7 Znázornění získaných dat ovlivněných hysterezí a náhodnými úskoky piezoelektrického stolku

4.5 Zpracování dat

V průběhu skenu jsou načtená data rovnou zpracována. Data získaná ze spektrometru jsou ve formě řady 1024 čísel. Prvním krokem je kontrola přítomnosti mionových píků. Ty se v datech projeví jako úzký pík s vysokou intenzitou viz obr. 4.8.



Obrázek 4.8 Získané spektrum obsahující mionový pík

Aktuální způsob detekce mionových píků je na základě kontroly vzájemných rozdílů mezi sadou nejvyšších naměřených hodnot. V případě že mezi těmito hodnotami dojde k náhlé změně velikosti jsou tyto hodnoty sníženy.

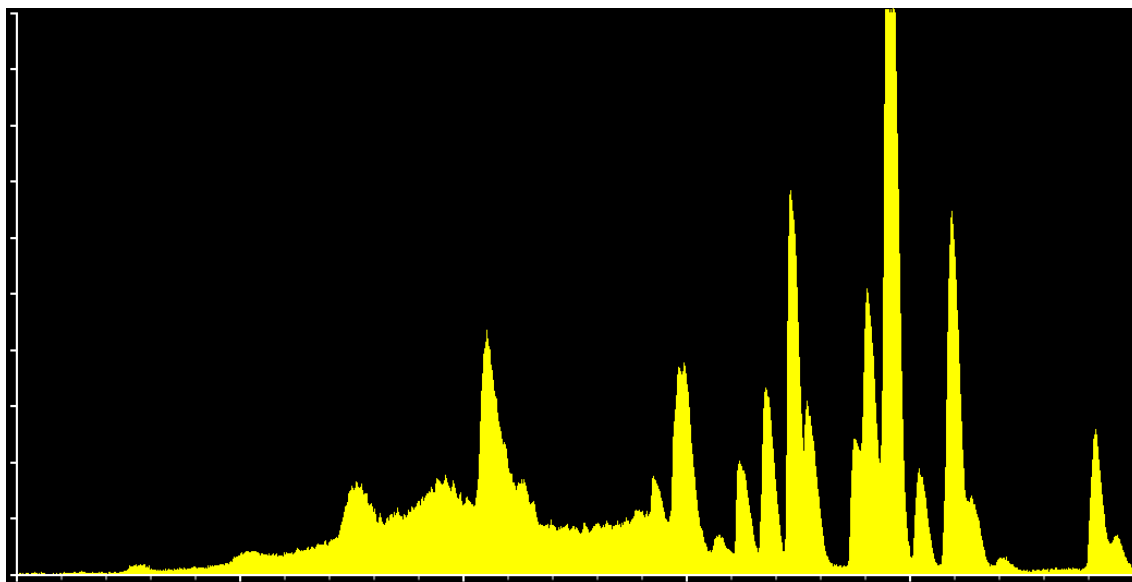
Po odstranění mionových píků je získána průměrná hodnota intenzity. Poté jsou data podělena referenčními daty pozadí. Tím jsou data upravena do formy, kde hodnoty nižší, než hodnoty pozadí budou v rozsahu 0–1 a hodnoty vyšší budou větší než 1. Tato forma dat poté usnadní hledání středu naměřeného píku, jelikož při výpočtu můžeme zanedbat hodnoty nižší než 1. Poloha píku je pak získána jako vážený průměr vlnových délek s přiřazenou vahou na základě naměřených dat.

$$\lambda_p = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i x_i}{\sum_{i=1}^n x_i}$$

Kde λ_p je vlnová délka odpovídající středu píku, x_i je naměřená hodnota a λ_i odpovídající vlnová délka. Vzhledem k tomu že odpovídající vlnová délka není součástí automaticky vyčtených dat ze spektrometru, musí být tyto hodnoty doplněny na základě znalosti nastavení rozsahu použitých vlnových délek při staru skenu.

Tato metoda je však nedostačující pro absorpční spektrum, jelikož v tomto případě jsou podstatné právě hodnoty nižší než 1. Z tohoto důvodu byla přidána možnost uživateli zvolit si o jaké spektrum se jedná a na základě to je metoda výpočtu upravena.

Aktuální zpracování dat předpokládá přítomnost pouze jednoho píku. Z tohoto důvodu při naměření spektra obsahujícího více píků (obrázek 4.9), nebudou výstupní hodnoty zpracování použitelné.

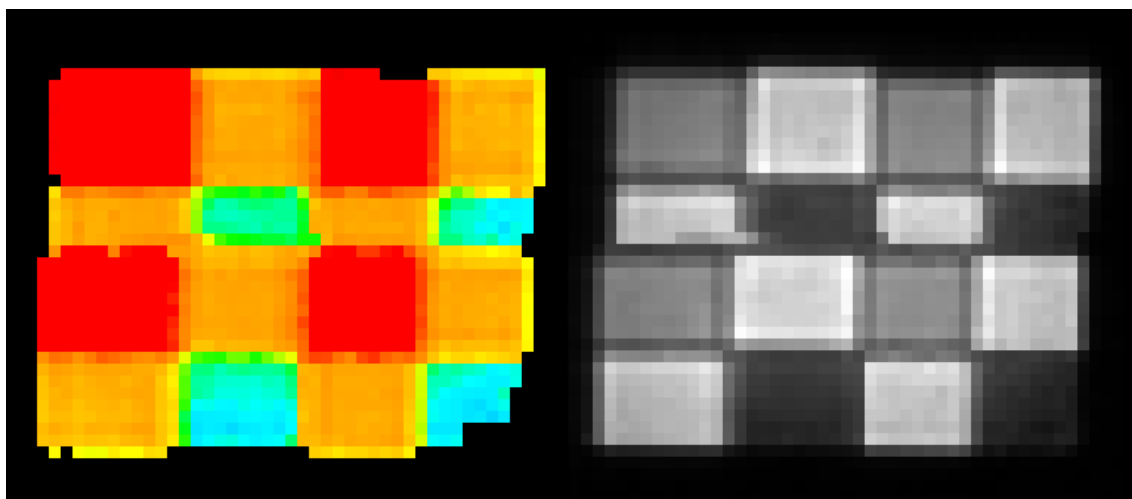


Obrázek 4.9 Spektrum získané při rozsvícených zářivkách v místnosti

Po dokončení skenu jsou naměřená data uložena do textového souboru, který obsahuje rozsah vlnových délek, pro které měření probíhalo, referenční data pozadí a indexovaná data z měření.

4.6 Vizualizace dat

Pro znázornění dat získaných skenem byla vytvořena možnost zobrazení intenzitní a barevné mapy skenu. Toto zobrazení je vytvořeno na základě zpracovaných dat. V případě intenzitní mapy je nejnižší hodnotě průměrné intenzity přiřazena černá barva, která pak se zvyšující se intenzitou přechází v bílou. Barevná mapa je pak tvořena na základě pozice píku, kde je vlnová délka středu píku převedena na odpovídající barvu a vykreslena do mapy.



Obrázek 4.10 Barevná mapa (vlevo) a intenzitní mapa (vpravo) vzorku

Na přání uživatele byla také přidána možnost zobrazení odpovídajícího spektra kliknutím do mapy a možnost exportu dat tohoto spektra.

Dále byla přidána možnost nahrát a zobrazit data předešlých skenů z uloženého textového souboru.

4.7 Experimentální ověření funkčnosti

Funkčnost aplikace byla ověřena snímáním dat na vzorku metapovrchu, který byl navržen jako barevný filtr. Tedy v případě osvětlení bílým světlem v transmisní konfiguraci má propouště pouze určitou vlnovou délku. Na obrázku 4.11 je zobrazen tento konkrétní metapovrch a jeho detail pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM) a je vidět, že se jedna 4×4 polí, kde každé pole obsahuje matici čtvercových otvorů o různé velikosti. Tyto otvory jsou vyrobeny pomocí leptání do hliníkové masky, která zároveň funguje jako pro světlo nepropustná folie mimo tento aktivní metapovrch. Jednotlivé velikosti otvorů se pravidelně střídají, aby vytvořili tzv. Bayerovu masku (též zvanou RGB masku), která nachází uplatnění jako barevná maska před snímacími čipy například barevných kamer nebo fotoaparátů.

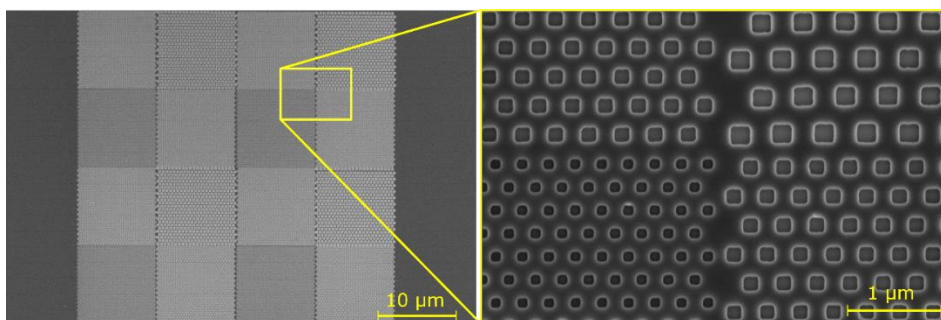
Tyto nanostruktury byly osvětleny zdola pomocí halogenové lampy s rozsahem vlnových délek 400 až 900 nm a toto bílé světlo bylo fokusováno (objektivem, NA 0,3) na vzorek pomocí invertovaného mikroskopu Nanonics MultiView 4000. Optický signál byl konfokálně sbírán horním objektivem (100x, NA 0,9) a zaveden optickým vláknem se vstupní aperturou 50 μm do spektrometru Shamrock 303 s CCD kamerou (Andor iDus 420) chlazenou na -65°C . Díky této sestavě byl signál konfokálně sbírán z oblasti

s laterálními rozměry menší než 2 μm . Jelikož měření bylo testováno na barevném filtru s velikostí jednotlivých polí $6 \times 6 \mu\text{m}^2$, bylo zvoleno rozlišení spektrální mapy na $50 \times 50 \text{ px}^2$ při celkové velikosti zorného pole $30 \times 30 \mu\text{m}^2$.

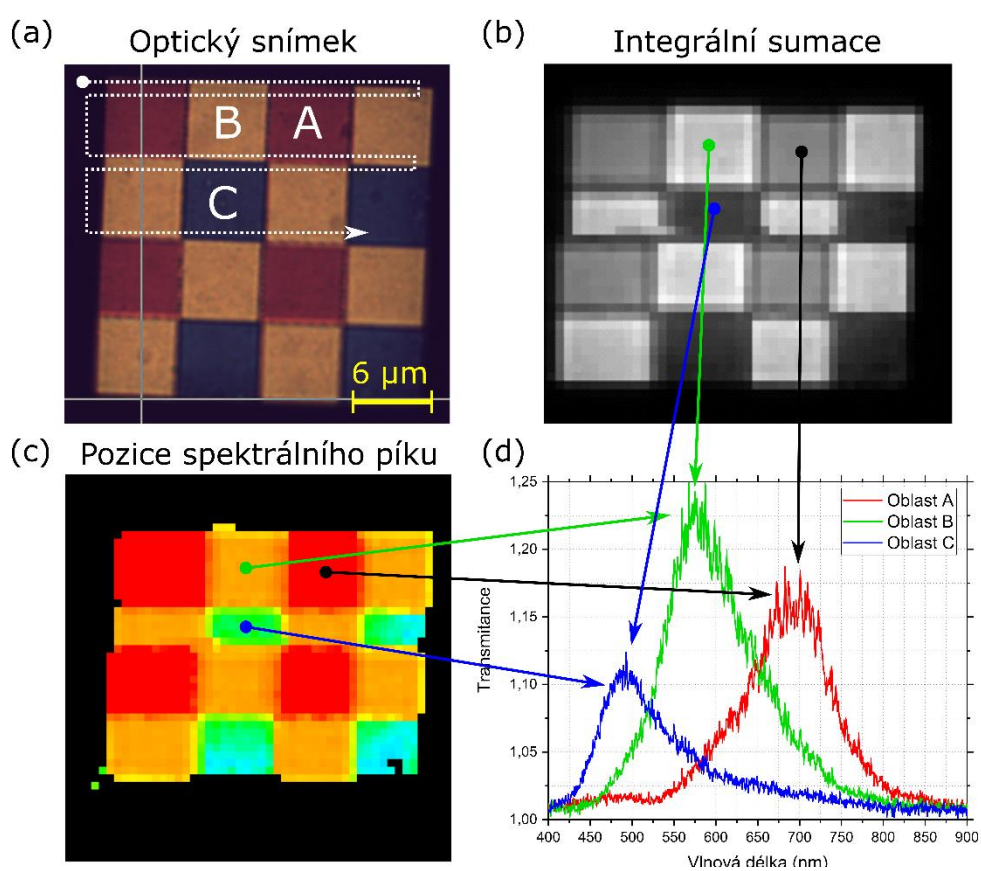
Na obrázku 4.12(a) je zobrazena zkoumaný barevný filtr, kde je vyznačena oblast A, která odpovídá červenému (R) pixlu, oblast B, která odpovídá zelenému pixlu (G), a oblast C, která koresponduje pixlu modrému (B). Rastrování pro spektrální mapování byl zvolen jednosměrný zleva doprava a shora dolů, jak je také naznačeno v obrázku 4.12(a). Obrázky 4.12(b) a (c) pak prezentují výsledky spektrálního mapování a vizualizaci těchto naměřených dat. Konkrétně obrázek 4.12(b) zobrazuje integrální sumaci od 400 nm do 900 nm, která tím pádem představuje plochu pod spektrální křivkou, a tedy intenzitu prošlého světla. Z obrázku je patrné, že nejvíce propustný pixel je zelený (oblast B), poté červený (oblast A) a nakonec modrý (oblast C). Vizualně ještě zajímavější výsledek zobrazuje obrázek 4.12(c), kde je zobrazeno rozložení pozice spektrálního píku pomocí váženého průměru (v anglické literatuře se tato vizualizace někdy označuje jako „mass-center mapping“). Z tohoto obrázku je velmi dobře patrné, jak pozice spektrálního píku odpovídá jednotlivým barevným pixelům. Použitá barevná škála byla kalibrována tak, aby odpovídala skutečné spektrální odezvě, tedy barvě v elektromagnetickém spektru. Je proto vidět, že modré pixely nejsou zcela v modré části spektra, ale získávají zelený nádech. To je poté dobře vysvětlitelné, pokud se podíváme na bodová spektra z jednotlivých oblastí (viz obrázek 4.12(d)), což ovládací program umožňuje uživatelům i zpětně po načtení uložených dat. Na bodovém spektru z modrého pixelu (z oblasti C) je vidět, že spektrum je sice hodně posunuté do modré oblasti, ale zároveň je vidět, že maximum má na 490 nm, což už je spektrálně modro-zelená barva, a navíc nenulová část spektrální křivky přechází přes zbytek celé viditelné části spektra (tj. levá část modré křivky je výrazně nenulová). Z bodových spekter si můžeme dále ověřit, že vizualizace dat je funkční, pokud si porovnáme výšku maxim jednotlivých bodových spekter s integrální sumací zobrazenou na obrázku 4.12(b). Opět vidíme, že zelený pixel (oblast B) propouští nejvíce světla atd.

Z výsledků měření je ale také zjevný problém rastrování vzorem. Ze SEM snímku i ze snímku optického je zřejmé, že celý barevný filtr je čtvercový. Ve vizualizaci dat (b) a (c) vidíme, ale ve směru pomalé skenovací osy (tj. shora dolů) silnou deformaci obrazu. Naopak ve směru rychlé skenovací osy (tj. zleva doprava) tuto deformaci nepozorujeme. Z toho vyplývá, že díky rastrování pouze v jednom směru se nám softwarově podařilo eliminovat alespoň deformaci v jedné ose. V druhé ose tento problém nelze nijak sofistikovaně vyřešit. Proto bylo v závěru této práce rozhodnuto upravit ovládací program do budoucna, aby mohl se vzorkem rastrovat pomocí krokových motorů a mikrometrových šroubů, které dokáží dosáhnout přesnosti okolo 1 μm . Vzhledem k tomu, že ale konfokální sběrná oblast je okolo 2 μm , bude tento skenovací krok dostatečný. Naopak krokové motory by neměly vykazovat žádnou hysterezi, a proto by obraz neměl být deformovaný ani v jednom směru.

Program byl pro tuto budoucí experimentální úpravu upraven, ale zatím se nestihl provést patřičné experimentální testy.



Obrázek 4.11 Snímek vzorku z elektronového mikroskopu.



Obrázek 4.12 a) Snímek vzorku pořízený kamerou na mikroskopu. Obsahuje naznačení průběhu skenu a označení tří oblastí: A, B a C. b) Intenzitní mapa vzorku vytvořená na základě získaných dat skenem. c) Barevná mapa znázorňující pozici píku spektra. d) Vykreslené průběhy spekter z oblastí A, B a C vzorku.

5 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala automatizací experimentální sestavy pro optickou spektroskopii, která je umístěná na Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT. V první části byl splněn první cíl bakalářské práce, a to rešeršní studie na optickou spektrální mikroskopii s důrazem na aplikace do nanofotonika. Dále byly popsány a specifikovány technické parametry jednotlivých zařízení experimentální sestavy.

Hlavním cílem této práce bylo vytvoření aplikace v jazyce C#, která úspěšně umožnila komunikaci mezi spektrometrem, řídicí jednotkou piezoelektrického stolku a počítačem. Díky této vzájemné komunikaci bylo možné získávat mapu optických spekter z nanostruktur připravených na vzorku. Byly provedeny mnoho testů, které ověřily funkčnost tohoto programu a tato skutečnost výrazně ušetřila uživatelům experimentální sestavy laboratorní čas. Navíc umožnila spektrální měření s doté doby nepředstavitelným rozlišením až $50 \times 50 \text{ px}^2$ při expoziční době 1 s (deset akumulací 0,1 s). Funkčnost programu a celkový vědecký přínos této práce byl demonstrován na spektrálním mapování dielektrických metapovrchů, které hrané hrají klíčovou roli v aplikacích ve 2D nanofotonice. Další zásadní částí programu bylo zpracování naměřených dat a jejich uživatelsky vhodná vizualizace. Při řešení a testování této části programu byl brán zřetel na zpětnou vazbu uživatelů a fyzikálně správnou interpretaci dat. Všechna data je možné v rámci programu exportovat, případně zpětně načíst a opět vizualizovat.

Během tvorby této aplikace byl nalezen pouze jeden problém, který nešel zcela eliminovat změnou řídicího kódu. Jednalo se o hysterezní chování piezoelektrického stolku během rastrování se vzorkem. Tento problém šlo částečně minimalizovat změnou trajektorie skenování vzorkem. Případně bylo možné tento artefakt omezit velikostí velikosti skenované plochy. Pro úplné odstranění tohoto problému byl program připraven na možnost rastrování pomocí krokových motorů. Na testování tohoto řešení bohužel čas.

Celý zdrojový kód je psán s přihlédnutím na budoucí možnost rozšíření o další funkce a další experimentální zařízení. Lze totiž očekávat, že vzhledem k různorodosti experimentálních přístupů všech aktivních uživatelů, se bude program i nadále rozšiřovat a přizpůsobovat aktuálním potřebám.

LITERATURA

- [1] OHTSU, Motoichi. *Principles of Nanophotonics*. 1. vyd. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2008. ISBN 978-1-58488-972-4.
- [2] NOVOTNY, Lukas a Bert HECHT. *Principles of Nano-Optics*. 2. vyd. B.m.: Cambridge University Press, 2012. ISBN 978-1-107-00546-4.
- [3] DEMIR, H V a S V GAPONENKO. *Applied Nanophotonics*. B.m.: Cambridge University Press, 2018. ISBN 9781107145504.
- [4] MERTENS, K. *Photovoltaics: Fundamentals, Technology, and Practice*. B.m.: Wiley, 2018. ISBN 9781119401049.
- [5] O'BRIEN, Jeremy L., Akira FURUSAWA a Jelena VUČKOVIĆ. Photonic quantum technologies. *Nature Photonics* [online]. 2009, **3**(12), 687–695. ISSN 1749-4885. Dostupné z: doi:10.1038/nphoton.2009.229
- [6] ROTHCHILD, Mordechai. Projection optical lithography. *Materials Today* [online]. 2005, **8**(2), 18–24. ISSN 13697021. Dostupné z: doi:10.1016/S1369-7021(05)00698-X
- [7] EGGELING, Christian. Advances in bioimaging—challenges and potentials. *Journal of Physics D: Applied Physics* [online]. 2018, **51**(4), 040201. ISSN 0022-3727. Dostupné z: doi:10.1088/1361-6463/aaa259
- [8] MAGHSOUDY-LOUYEH, S., M. KROPF a B. R. TITTMANN. Review of Progress in Atomic Force Microscopy. *The Open Neuroimaging Journal* [online]. 2018, **12**(1), 86–104. ISSN 1874-4400. Dostupné z: doi:10.2174/1874440001812010086
- [9] KUO, J. *Electron Microscopy: Methods and Protocols*. B.m.: Humana Press, 2007. Methods in molecular biology. ISBN 9781597452946.
- [10] BURGESS, C a K D MIELENZ. *Advances in Standards and Methodology in Spectrophotometry* [online]. B.m.: Elsevier Science, 2012. ISSN. ISBN 9780444599056. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=6Rg7AAAAQBAJ>
- [11] XII. A method of examining refractive and dispersive powers, by prismatic reflection. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* [online]. 1802, **92**, 365–380. ISSN 0261-0523. Dostupné z: doi:10.1098/rstl.1802.0014
- [12] BRAND, J C D. *Lines of Light: The Sources of Dispersive Spectroscopy, 1800-1930* [online]. B.m.: Gordon & Breach Publ., 1995. ISBN 9782884491624. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=1O2U8OMfLVEC>
- [13] HALLIDAY, D, R RESNICK a J WALKER. *Fundamentals of Physics* [online]. B.m.: John Wiley & Sons, 2010. ISBN 9780470469118. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=y7IYHi4OZB0C>
- [14] BENDIAB, Nedjma, Julien RENARD, Cornelia SCHWARZ, Antoine RESERBAT-PLANTEY, Léo DJEVAHIRDJIAN, Vincent BOUCHIAT, Johann CORAUX a Laëtitia MARTY. Unravelling external perturbation effects on the optical phonon response of graphene. *Journal of Raman Spectroscopy* [online]. 2018, **49**(1), 130–145. ISSN 03770486. Dostupné z: doi:10.1002/jrs.5267
- [15] SIEMONS, Nicholas a Alessio SERAFINI. Multiple Exciton Generation in Nanostructures for Advanced Photovoltaic Cells. *Journal of Nanotechnology* [online]. 2018, **2018**, 1–12. ISSN 1687-9503. Dostupné

- z: doi:10.1155/2018/7285483
- [16] HOMOLA, Jiří. Present and future of surface plasmon resonance biosensors. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* [online]. 2003, **377**(3), 528–539. ISSN 1618-2642. Dostupné z: doi:10.1007/s00216-003-2101-0
 - [17] KUMAR, P. *Fundamentals and Techniques of Biophysics and Molecular Biology* [online]. B.m.: Pathfinder Publication unit of PAPL, nedatováno. Life Sciences. ISBN 9789380473154. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=VFhKDwAAQBAJ>
 - [18] NAVRÁTIL, Leoš a Rosina JOZEF. *Medicínská biofyzika*. Praha: Grada Publishing, 2005. ISBN 978-80-247-1152-2.
 - [19] PASSI, Manjusha a Bonamali PAL. A review on CaTiO₃ photocatalyst: Activity enhancement methods and photocatalytic applications. *Powder Technology* [online]. 2021, **388**, 274–304. ISSN 00325910. Dostupné z: doi:10.1016/j.powtec.2021.04.056
 - [20] CHEN, Yichuan, Linrui ZHANG, Yongzhe ZHANG, Hongli GAO a Hui YAN. Large-area perovskite solar cells – a review of recent progress and issues. *RSC Advances* [online]. 2018, **8**(19), 10489–10508. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C8RA00384J
 - [21] ADJOKATSE, Sampson, Hong-Hua FANG a Maria Antonietta LOI. Broadly tunable metal halide perovskites for solid-state light-emission applications. *Materials Today* [online]. 2017, **20**(8), 413–424. ISSN 13697021. Dostupné z: doi:10.1016/j.mattod.2017.03.021
 - [22] GUNER, Tugrul a Mustafa M. DEMIR. A Review on Halide Perovskites as Color Conversion Layers in White Light Emitting Diode Applications. *physica status solidi (a)* [online]. 2018, **215**(13), 1800120. ISSN 18626300. Dostupné z: doi:10.1002/pssa.201800120
 - [23] GUO, Yifei, Xiuli FU a Zhijian PENG. Controllable synthesis of MoS₂ nanostructures from monolayer flakes, few-layer pyramids to multilayer blocks by catalyst-assisted thermal evaporation. *Journal of Materials Science* [online]. 2018, **53**(11), 8098–8107. ISSN 0022-2461. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-018-2103-0
 - [24] XU, Kai, Zhenxing WANG, Xiaolei DU, Muhammad SAFDAR, Chao JIANG a Jun HE. Atomic-layer triangular {WSe}₂ sheets: synthesis and layer-dependent photoluminescence property. *Nanotechnology* [online]. 2013, **24**(46), 465705. Dostupné z: doi:10.1088/0957-4484/24/46/465705
 - [25] ZELENKA, J. *Piezoelektrické rezonátory a jejich použití* [online]. B.m.: Academia, 1983. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=NukmGwAACAAJ>
 - [26] NOURBAKHSH, Amirhasan, Mirco CANTORO, Tom VOSCH, Geoffrey POURTOIS, Francesca CLEMENTE, Marleen H VAN DER VEEN, Johan HOFKENS, Marc M HEYNS, Stefan De GENDT a Bert F SELS. Bandgap opening in oxygen plasma-treated graphene. *Nanotechnology* [online]. 2010, **21**(43), 435203. Dostupné z: doi:10.1088/0957-4484/21/43/435203
 - [27] RUPITSCH, S J. *Piezoelectric Sensors and Actuators: Fundamentals and Applications* [online]. B.m.: Springer Berlin Heidelberg, 2018. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering. ISBN 9783662575345. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=2JdmDwAAQBAJ>
 - [28] MINOVICH, Alexander E., Andrey E. MIROSHNICHENKO, Anton Y.

- BYKOV, Tatiana V. MURZINA, Dragomir N. NESHEV a Yuri S. KIVSHAR. Functional and nonlinear optical metasurfaces. *Laser & Photonics Reviews* [online]. 2015, **9**(2), 195–213. ISSN 18638880. Dostupné z: doi:10.1002/lpor.201400402
- [29] ZHELUDEV, I S. *Physics of Crystalline Dielectrics: Volume 2 Electrical Properties* [online]. B.m.: Springer US, 2013. Physics of Crystalline Dielectrics. ISBN 9781461589846. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=lrjeBwAAQBAJ>
- [30] SAHOO, Mihir Kumar a Paresh KALE. Integration of silicon nanowires in solar cell structure for efficiency enhancement: A review. *Journal of Materiomics* [online]. 2019, **5**(1), 34–48. ISSN 23528478. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmat.2018.11.007
- [31] YANG, J. *An Introduction to the Theory of Piezoelectricity* [online]. B.m.: Springer International Publishing, 2018. Advances in Mechanics and Mathematics. ISBN 9783030031374. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=n9mBDwAAQBAJ>
- [32] LUO, Zhenyue, Daming XU a Shin-Tson WU. Emerging Quantum-Dots-Enhanced LCDs. *Journal of Display Technology* [online]. 2014, **10**(7), 526–539. ISSN 1551-319X. Dostupné z: doi:10.1109/JDT.2014.2325218
- [33] Electromagnetic spectrum. *Mini Physics* [online]. [vid. 2021-05-16]. Dostupné z: https://www.miniphysics.com/electromagnetic-spectrum_25.html
- [34] KULKARNI, Sneha A., Tom BAIKIE, Pablo P. BOIX, Natalia YANTARA, Nripan MATHEWS a Subodh MHAISALKAR. Band-gap tuning of lead halide perovskites using a sequential deposition process. *J. Mater. Chem. A* [online]. 2014, **2**(24), 9221–9225. ISSN 2050-7488. Dostupné z: doi:10.1039/C4TA00435C
- [35] Upsc Chemistry. *ThinkVidya Learning Pvt* [online]. [vid. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.urbanpro.com/upsc-exams/upsc-chemistry-jablonski-diagram>
- [36] SCHRAMM, R. *X-ray Fluorescence Analysis: Practical and Easy* [online]. B.m.: Fluxana, 2012. ISBN 9783000414763. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=9xdlrgEACAAJ>
- [37] GOETZ, Katelyn P., Alexander D. TAYLOR, Fabian PAULUS a Yana VAYNZOF. Shining Light on the Photoluminescence Properties of Metal Halide Perovskites. *Advanced Functional Materials* [online]. 2020, **30**(23), 1910004. ISSN 1616-301X. Dostupné z: doi:10.1002/adfm.201910004
- [38] What is a Spectrometer? *Edinburgh Instruments* [online]. 2021 [vid. 2021-05-09]. Dostupné z: <https://www.edinst.com/blog/what-is-a-spectrometer/>
- [39] Shamrock 303i. *Andor* [online]. [vid. 2021-05-16]. Dostupné z: https://www.snowhouse.ca/pdf/Andor_Shamrock_303_Specifications.1.pdf
- [40] RICHEY-SIMONSEN, Lauren R., Nicholas J. BORYS, Tevye R. KUYKENDALL, P. James SCHUCK, Shaul ALONI a Jordan M. GERTON. Investigating surface effects of GaN nanowires using confocal microscopy at below-band gap excitation. *Journal of Materials Research* [online]. 2017, **32**(21), 4076–4086. ISSN 0884-2914. Dostupné z: doi:10.1557/jmr.2017.361
- [41] Umělé svaly. *Průmyslové spektrum* [online]. [vid. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/umele-svaly>
- [42] YAN, Dongdong, Tongchao SHI, Zhigang ZANG, Shuangyi ZHAO, Juan DU a Yuxin LENG. Stable and low-threshold whispering-gallery-mode lasing from

- modified CsPbBr₃ perovskite quantum dots@SiO₂ sphere. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2020, **401**, 126066. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2020.126066
- [43] Piezoelectricity. *APC Internacional* [online]. [vid. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezoelectricity.html>
- [44] 3D FlatScan. *Nanonics Imaging Ltd.* [online]. [vid. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.nanonics.co.il/products/flatscan-scanning-stage#software>